

УДК 533.9

## Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы

### Часть I. Особенности, наблюдавшиеся при экспериментальном исследовании индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле\*

А. Ф. Александров, Г. Э. Бугров, К. В. Вавилин, И. Ф. Керимова,  
Е. А. Кралькина, В. Б. Павлов, В. Ю. Плаксин  
Физический факультет МГУ, Москва, Россия

А. А. Рухадзе  
Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*Предпринята попытка объяснить особенности поведения индуктивного ВЧ-разряда как при отсутствии, так и при наличии магнитного поля с единой позиции, представив разряд как самосогласованную систему, в которой доля мощности ВЧ-генератора, поглощаемая плазмой, определяется параметрами самой плазмы. В части I серии работ собраны экспериментальные данные, стимулирующие появления всего цикла исследований.*

В течение нескольких десятилетий индуктивные плазменные ВЧ-реакторы и источники ионов низкого давления являются важнейшей составляющей современных земных и космических технологий. Широкому распространению технических применений индуктивного ВЧ-разряда способствуют его основные достоинства: отсутствие контакта плазмы с металлическими электродами; возможность получения высокой концентрации электронов при относительно невысоком уровне ВЧ-мощности; небольшие температуры электронов; невысокий потенциал плазмы относительно стенок, ограничивающих разряд. Последнее, помимо минимизации потерь мощности на стенках источника плазмы, позволяет избежать повреждения поверхности образцов ионами высоких энергий при их обработке в разряде. Неудивительно, что исследованию плазмы индуктивного ВЧ-разряда и разработке новых технологий на его основе ежегодно посвящены десятки публикаций [1–4]. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, посвященный изучению свойств индуктивного разряда, построен ряд моделей разряда [4–6]. Однако анализ экспериментальных данных, сравнение результатов, полученных разными авторами при исследовании индуктивного ВЧ-разряда, интерпретация экспериментов зачастую не представляются возможными [7, 8], так как в работах точно не зафиксированы условия эксперимента. Речь идет о наличии неучтенных "скрытых" факторов,

влияющих на условия эксперимента. К ним относятся наличие емкостной составляющей разряда, наличие металлических кожухов источников плазмы и установочных фланцев, в которых возможно возбуждение индукционных токов, разогрев системы согласования и т. д. Авторы настоящей серии публикаций в течение ряда лет занимались разработкой ВЧ-источников плазмы, основанных на индуктивном разряде, помещенном во внешнее магнитное поле [9–13]. В своей работе авторы столкнулись с проявлением "скрытых" факторов эксперимента при апробации источников ионов в составе различных технологических установок. Полученный опыт дал толчок к проведению детального исследования механизма ввода ВЧ-мощности в индуктивный разряд при наличии и отсутствии магнитного поля, выявлению каналов потерь ВЧ-мощности.

К настоящему времени роль потерь энергии во внешней цепи индуктивного ВЧ-разряда без магнитного поля наиболее последовательно рассмотрена в работах [5, 6]. Основываясь на трансформаторной модели индуктивного ВЧ-разряда, авторы этих работ показали, что ВЧ-мощность, отдаваемая ВЧ-генератором во внешнюю цепь, не тождественна мощности, поглощаемой плазмой, а перераспределяется между двумя каналами: плазмой и активными элементами внешней цепи. При этом доля мощности, поглощаемая плазмой, зависит от параметров последней, а именно от концентрации электронов, давления нейтрального газа, размеров и формы источника плазмы. При наложении на индуктивный ВЧ-разряд внешнего магнитного поля

\* Часть II будет опубликована в № 5 настоящего журнала.

поведение разряда значительно усложняется [4, 9—18]. Авторами предпринята попытка объяснить особенности поведения разряда как при отсутствии, так и при наличии магнитного поля с единой позиции, представив разряд как самоогласованную систему, в которой доля мощности ВЧ-генератора, поглощаемая плазмой, определяется параметрами самой плазмы. Рассмотрено влияние емкостной составляющей на ввод ВЧ-мощности в плазму, а также на характер поведения разряда при изменении величины внешнего магнитного поля и мощности ВЧ-генератора.

### Схема и методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. В состав установки входит вакуумная камера объемом 0,15 м<sup>3</sup>, снабженная четырьмя установочными фланцами. Последние использовались для крепления источников ионов внутри камеры и размещения электрических вводов диагностического оборудования. Внутри вакуумной камеры находится шток, который может перемещаться в ней без нарушения вакуума при управлении извне. В большинстве экспериментов на штоке монтировался цилиндр Фарадея, служивший для измерения плотности ионного тока. Откачка системы осуществлялась с помощью насосов форвакуумного НВР-16Д (17,6 л/с), бустерного ДВН-50 (50 л/с) и диффузионного Н-400 (5900 л/с).

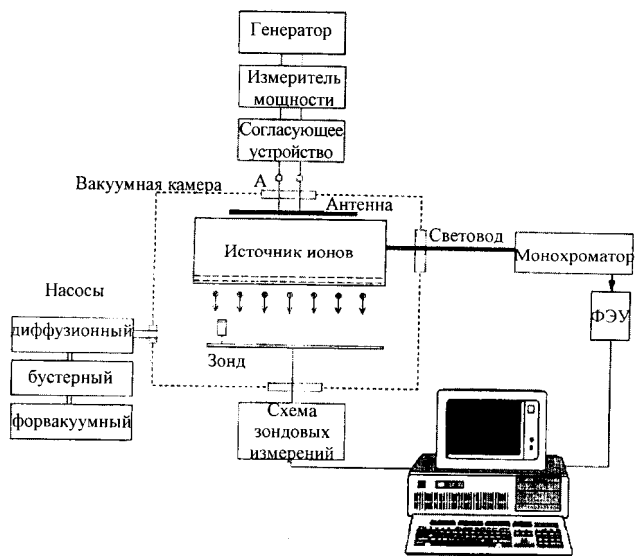


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В работе использовались источники ионов, схема которых изображена на рис. 2. Источники ионов состояли из цилиндрической стеклянной газоразрядной камеры 1 с газоводом 2, металлического кожуха 3, ионно-оптической системы 4, представлявшей собой три перфорированных

металлических электрода, и магнитной системы 5. Диаметр газоразрядных камер составлял 10 и 20 см, длина 10, 15 и 20 см.

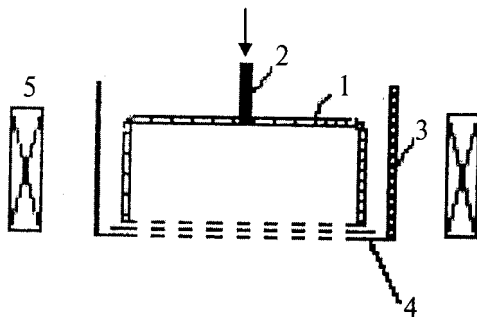


Рис. 2. Схема источника ионов

Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы применялись индукторы (антенны). На верхней торцевой или боковой поверхности газоразрядных камер были расположены спиральные антенны, выполненные из медной трубки диаметром 3 мм. В большинстве экспериментов антенны охлаждались потоком воды. Магнитное поле в источниках плазмы создавалось с помощью магнитных систем, основанных на электромагнитах. Соленоиды позволяли изменять индукцию осевого магнитного поля внутри источника плазмы в диапазоне 0—30 мТл с неоднородностью порядка 30 %.

Основной объем работы был выполнен с помощью ВЧ-генераторов ГТВЭ-1000, работающих на частоте 13,56 МГц и позволяющих плавно регулировать мощность в диапазоне 0—1000 Вт. Мощность от ВЧ-генератора поступала на вход системы согласования, на выходе которой была подсоединена антенна, поддерживающая разряд в источнике плазмы (см. рис. 1). Мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь  $P_{Gen}$ , определялась как разница между падающей  $P_F$  и отраженной  $P_R$  мощностями. Она измерялась с помощью измерителя мощности CN-101L, включенного в 50-омную линию между ВЧ-генератором и системой согласования. В процессе экспериментов отраженная мощность составляла 1—10 % от падающей. При изучении работы источников плазмы, работающих в режиме источников ионов, на электроды ионно-оптической системы подавались напряжения, соответствующие схеме "ускорение — замедление".

В процессе экспериментов контролировался ионный ток, извлекаемый из источника. Ряд экспериментов был выполнен без подачи напряжения на электроды ионно-оптической системы. В этом случае с помощью зонда, представляющего собой цилиндр Фарадея, измерялся ток ионов или электронов, истекающих из источника.

Для контроля параметров плазмы измерялась интенсивность свечения плазмы. Излучение источника плазмы с помощью световода попадало на входную щель монохроматора МДР-23, на

выходе которого был установлен фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100. Сигнал с выхода фотоумножителя усиливался усилителем и регистрировался с помощью платы АЦП, встроенной в компьютер. В настоящей работе регистрировалось интегральное свечение плазмы в диапазоне  $4000\text{--}4500\text{ \AA}$ .

### Результаты экспериментов

В настоящем разделе приведены данные, стимулирующие появление всего цикла исследований. На рис. 3 показаны зависимости электронного тока на зонд от величины внешнего магнитного поля, полученные при работе источника ионов при отсутствии и наличии металлического кожуха. Результаты получены с источником ионов диаметром 10 см, разряд возбуждался спиральной антенной, расположенной на боковой поверхности газоразрядной камеры. Измерения выполнялись в случае, когда извлекающие ионы потенциалы на электродах ионно-оптической системы отсутствовали. Можно видеть, что для зависимости электронного тока на зонд  $i_e$  от индукции внешнего магнитного поля  $B$  характерно наличие двух максимумов, причем абсолютная величина второго максимума заметно больше первого в случае отсутствия металлического кожуха. Напротив, в источнике с металлическим кожухом величина второго максимума существенно меньше первого. Измерения выполнялись при одной и той же мощности ВЧ-генератора, отдаваемой во внешнюю цепь. Многократное повторение экспериментов подтвердило приведенный выше результат.

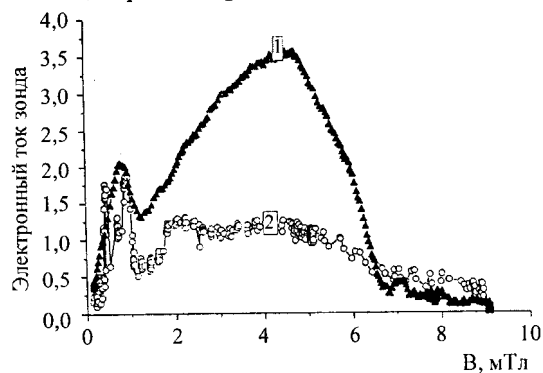


Рис. 3. Зависимость электронного тока на зонд от величины внешнего магнитного поля:

1 — источник ионов без металлического кожуха;  
2 — с металлическим кожухом. Аргон, 5 Торр, 100 Вт

Интересные результаты получены при работе с прототипом источника ионов диаметром 15 см и длиной 22 см со спиральной антенной, расположенной над верхним торцом источника на расстоянии 3 см. Значительное расстояние между антенной и плазмой позволило уменьшить емкостную связь между ними.

На рис. 4, *a–e* показаны зависимости ионного тока насыщения на зонд от индукции внешнего магнитного поля, полученные при различных расходах аргона и воздуха, мощностях ВЧ-генератора и длинах газоразрядной камеры источников ионов. Как видно, индуктивный ВЧ-разряд, возбуждаемый верхней спиральной антенной, существует в режиме с высокой плотностью плазмы лишь в ограниченной области по магнитному полю, причем ширина этой области зависит от рода рабочего газа, его расхода, мощности ВЧ-генератора, длины газоразрядной камеры.

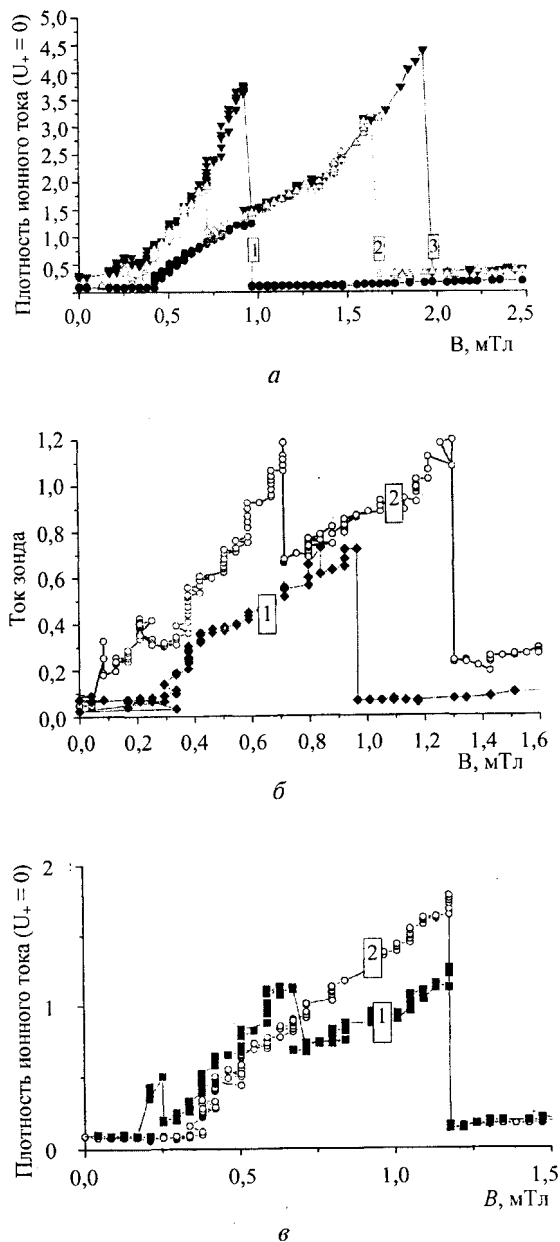
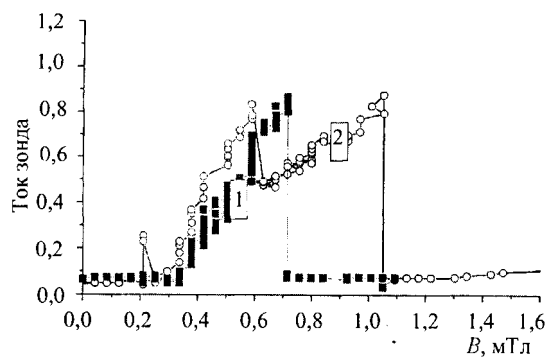
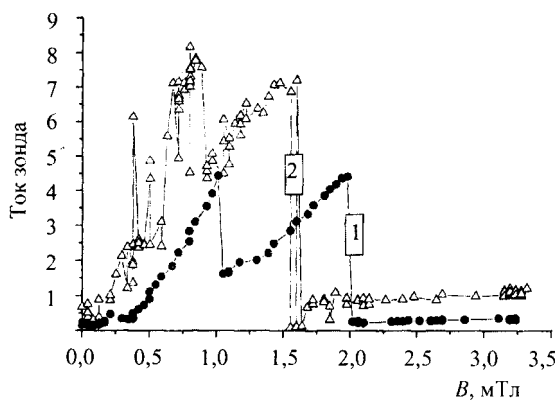


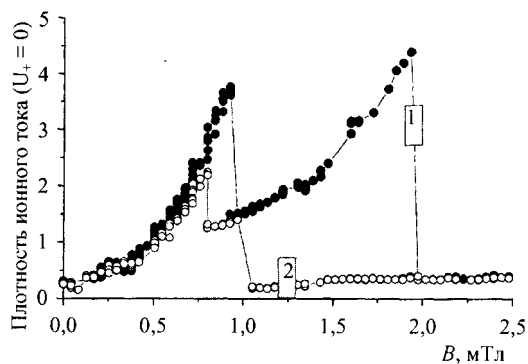
Рис. 4. Зависимость ионного тока насыщения на зонд от величины внешнего магнитного поля:  
*a* — при различных мощностях ВЧ-генератора, Вт: 1 — 200; 2 — 400; 3 — 500; Аргон, 40 Торр; *b* — при различных расходах аргона, Торр: 1 — 20; 2 — 60; 300 Вт; *v* — в источниках ионов с газоразрядной камерой длиной, см: 1 — 16; 2 — 22; Аргон, 40 Торр; 300 Вт



а



б



в

Рис. 4. Окончание:

а — при работе источника ионов: 1 — на воздухе; 2 — на аргоне; 30 Торр; 300 Вт; б — при работе источника ионов в режимах: 1 — без извлечения ионов; 2 — с извлечением; в — при увеличении (1) и уменьшении (2)  $B$

Заметим, что в области больших значений магнитного поля наблюдаются резкие срывы разряда. В работе [18] показано, что последние могут происходить в результате рассогласования нагрузки с ВЧ-генератором из-за изменения реактивной составляющей импеданса плазмы при изменении внешнего магнитного поля. В настоящем эксперименте согласование нагрузки с ВЧ-генератором осуществлялось при каждом из рассмотренных значений магнитного поля, так что величина ВЧ-мощности, отдаваемой генератором во внешнюю цепь, была постоянной. Однако и в этом случае наблюдаются срывы разряда. Эксперименты показали, что правая граница существования разряда в режиме с высокой концентрацией плазмы смещается вправо при уве-

личении мощности ВЧ-генератора, расходе рабочего газа и замене воздуха на аргон. Напротив, при работе источника ионов в режиме извлечения ионов наблюдается смещение правой границы существования разряда в область меньших значений  $B$  (см. рис. 4, б).

Эксперименты показали, что увеличение мощности ВЧ-генератора, расхода рабочего газа, замена воздуха на аргон и уменьшение длины источника ионов приводят не только к смещению правой границы существования разряда в область больших магнитных полей, но и к появлению второго, а иногда и третьего максимума ионного тока в области меньших магнитных полей. Вместе с немонотонной зависимостью ионного тока от величины магнитного поля наблюдалась и немонотонная зависимость свечения плазмы, что позволило сделать вывод о немонотонной зависимости плотности плазмы от  $B$ .

Кроме того, в ряде случаев был обнаружен гистерезис зависимости параметров плазмы от магнитного поля (см. рис. 4, в).

### Выводы

В результате экспериментов с ВЧ-индуктивным разрядом, помещенным во внешнее магнитное поле, были обнаружены:

- зависимость параметров плазмы от наличия металлических предметов вблизи разряда;
- срывы разряда в области больших магнитных полей;
- немонотонная зависимость параметров плазмы от  $B$ ;
- гистерезис зависимости параметров плазмы от  $B$ ;
- зависимость параметров разряда от наличия или отсутствия вытягивающего напряжения на электродах ионно-оптической системы.

Попытки интерпретации полученных результатов навели авторов на мысль, что немаловажную роль в экспериментах могут играть "неучтенные" факторы, а именно: неучтенные потери ВЧ-мощности во внешней цепи, уменьшающие долю мощности, поглощаемую плазмой, а также наличие емкостной составляющей разряда. Для того чтобы разобраться в причинах наблюдавшихся эффектов, был выполнен цикл экспериментальных исследований, направленных на учет потерь мощности во внешней цепи в индуктивном ВЧ-разряде.

### Литература

1. Proceedings of the Eight International Conference on Plasma Surface Engineering Garmisch-Partenkirchen, German, 9–13 September 2002. Surface and Coating Technologies, 174–174, 2003.
2. High Density Plasma Sources, ed. Popov O. A., Noyes Public., New-Jersey, USA, 1995.
3. Electron Cyclotron Emission and Electron Heating, ed. G. Girrizzi, World Scientific, Paris, France 2002.

4. *Chen F. F., Chang J. P.* Lecture Notes on Principles of Plasma Processing Kluwer/Plenum, New York, 2002.
5. *Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M.*// Plasma Sources Sci. Technol. 1992. № 1. P. 179–186.
6. *Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.*// Ibid. 1994. № 3. P. 169–176.
7. *Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.*// J. of Applied Physics. 1999. V. 85. № 3. P. 703–712.
8. *Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.*// Plasma Sources Sci. Technol. 2002. № 11. P. 525–543.
9. *Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Воробьев Н. Ф. и др.*// Прикладная физика. 1995. № 1. С. 3–22.
10. *Shamrai K. P., Alexandrov A. F., Bougrov G. E. et al.*// Quasistatic Plasma Sources: Proc. XXIII Int. Conf. Phen. Ion. Gas., 17–22 July 1997, Toulouse — France.
11. *Alexandrov A. F., Kralkina E. A., Obukhov V. A. et al.*// Journ. Moscow Phys. Soc. 1996. V. 6. P. 113–120.
12. *Alexandrov A. F., Bugrov G. E., Kralkina E. A. et al.*: Proc. XXV Int. Conf. Phen. Ion. Gas., 19–24 July 2001, Nagoya, Japan.
13. *Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В. и др.*// Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 5.
14. *Boswell R. W.*// Plasma Phys. Contr. Fusion, 1984. V. 26. P. 1147.
15. *Chen F. F.*// Ibid. 1983. V. 1. Plenum Press. N-Y — London.
16. *Chen F. F., Chevalier G.*// Journ. Vac. Sci. Techn. 1992. V. A10. P. 1389.
17. *Chen F. F., Amush D.*// Plasma Phys. 1997. V. 4. P. 3411.
18. *Shamrai K. R., Taranov V. B.*// Plasma Sources Sci. Techn. 1999. V. 5. P. 474.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

## Examination of an inductive high-frequency discharge as the self-consistent system

### Part I. Features to be observed at the experimental examination of an inductive high-frequency discharge, located in an exterior magnetic field

*A. F. Aleksandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. F. Kerimova, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin*

Physical Faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia

*A. A. Rukhadze*

General Physics Institute, Moscow, Russia

*In the present series of works consideration is made to features of behaviour of a high-frequency discharge with a magnetic field and without one. Consideration is made with an unified position, which views the discharge as a self-consistent system, in which a share of power of a high-frequency generator, immersed by plasma, is determined with parameters of the plasma. The experimental data, boosting the occurrence of all cycle of examinations, are collected in the first part of this series of works.*

УДК 533.9

## Бактерицидное действие компонентов плазмы атмосферного давления на *Escherichia coli*

*Э. А. Соснин, С. М. Авдеев, Е. А. Кузнецова,  
Л. В. Лаврентьева, М. В. Ерофеев*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

*А. И. Суслов*

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

*Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей бактерицидного действия компонентов плазмы атмосферного давления на культуру *Escherichia coli*. Показано, что наилучшим стерилизующим действием обладает комбинация таких компонентов плазмы как УФ-излучение на  $190 < \lambda < 220$  нм и электронейтральные частицы.*

Начиная с 60-х гг. как одна из альтернатив методам холодной стерилизации (химическая обработка) и стерилизации УФ-излучением (УФ-стерилизация [1–4]) поверхностей, газов и жидких сред рассматривается стерилизация в

условиях частично ионизованного газа [5–9]. В этом случае стерилизующим агентом служит плазма газового разряда (плазменная стерилизация). Плазма — это многокомпонентная система, включающая излучение плазмы, заряженные